

El aparato ultrasónico del I.E.T.c.c.

J. M. TOBÍO, Dr. en Química Industrial
(División de Metrología del I.E.T.c.c.)

467-2

sinopsis

En este trabajo se da la descripción de un nuevo aparato ultrasónico desarrollado en los laboratorios del I.E.T.c.c. (Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento), que viene a completar los equipos para ensayos no destructivos de que dispone la División de Metrología.

Como características más destacadas de este aparato se señalan: la posibilidad de trabajar a frecuencias diferentes (20 a 200 kc/seg), empleando transductores tanto de titanato de bario como de ferrita (Ferrocube); control auditivo heterodino de la frecuencia de marcaje, y facultad opcional de observar el impulso recibido tanto en forma de onda amortiguada de alta frecuencia como de impulso diferenciado de baja frecuencia y elevada exactitud.

También se revisan los fundamentos teóricos del método de impulsos, así como las aplicaciones más usuales del mismo en cuanto se refiere a su empleo en hormigón en masa, estructural e incluso probetas de laboratorio.

El método revisado y reseñado posee las limitaciones inherentes a esta clase de procedimientos no destructivos que han sido señaladas en trabajos anteriores.

1 Introducción

En otro trabajo (1) se hacía ver la conveniencia de disponer, dentro de un laboratorio de ensayos no destructivos, de un equipo ultrasónico de auscultación visual. En el caso de estudiar ultrasónicamente un hormigón, con su secuela de inhomogeneidades e imperfecciones, la simple indicación del tiempo de propagación de un impulso elástico a través de un espesor determinado de hormigón, puede no ser suficiente para fines prácticos.

El aparato que ahora presentamos permite, al mismo tiempo que una información cuantitativa de los tiempos de propagación—parámetro fundamental para la determinación de las constantes elásticas del material—, un cierto tipo de indicación cualitativa que, correctamente interpretada, permite deducir consideraciones respecto a la calidad del material.

En efecto, el hecho de aparecer sobre la pantalla de un tubo de rayos catódicos tanto el impulso transmitido como el recibido, es de gran ayuda para sacar conclusiones sobre la estructura física del material en estudio, su constante de atenuación (ligada con el frotamiento interno), presencia o ausencia de ondas secundarias reflejadas, etc.

En el mercado existen diversos aparatos ultrasónicos para el estudio de materiales homogéneos, metales principalmente, cuyo grado de perfección ha alcanzado límites muy elevados. Para el hormigón, por el contrario, solamente dos o tres firmas en el mundo han lanzado equipos ultrasónicos, tales como el Soniscope, el UTC y otros que han sido estudiados en otro lugar (2) y de los cuales la mayor parte de los detalles permanecen secretos.

La Superioridad del Instituto consideró oportuno estudiar en toda su amplitud el tema en cuestión y llegar, si ello era posible, al proyecto y construcción de un aparato netamente original y de aplicación exclusiva al hormigón.

Después de varios años de experimentación se llegó al equipo ultrasónico del I.E.T.c.c., del que se da noticia en este trabajo.

- (1) Tobío, J. M.: Medidas y ensayos no destructivos. Monografía núm. 237 del I.E.T.c.c. Madrid (1964), pág. 32.
- (2) Tobío, J. M.: Ensayos no destructivos en el hormigón. INFORMES DE LA CONSTRUCCION, núm. 84, octubre (1956).

2 Fundamentos teóricos

La medida de las constantes de propagación de una onda elástica en un medio material cualquiera puede hacerse por muchos procedimientos: Interferómetro Pierce, absorción térmica, amortiguamiento viscoso, redes ópticas de difracción, reverberación y métodos de impulsos, la mayoría de los cuales resultan muy adecuados para líquidos y gases, pero muy defectuosos cuando se trata de sólidos.

Sin embargo, el último de los métodos mencionados, el de impulsos, empleado por vez primera por Biquard y Agier (1), presenta algunas posibilidades para la medida y constituye el fundamento de los aparatos existentes en el momento actual.

Se basa en enviar un tren muy corto de ondas elásticas sobre la superficie de un sólido y recibir en la cara opuesta del mismo la onda transmitida. Esta onda, convenientemente convertida en una onda eléctrica, puede ser amplificada y modificada para la presentación en la pantalla de un tubo de rayos catódicos.

El sencillo esquema de la figura 1 muestra el fundamento de este sistema de medida. Se trata de un esquema de principio, del que derivan los montajes más o menos complicados que se emplean en la práctica.

Un generador de impulsos (eléctricos) induce sobre el transductor-emisor, a través del oscilador de impulsos, un tren de ondas de una frecuencia de varios cientos de kilociclos, que el transductor se encarga de convertir en una excitación elástica que penetra en el sólido. Al mismo tiempo, el generador de impulsos manda un impulso eléctrico al tubo de rayos catódicos.

El impulso elástico del emisor atraviesa el sólido, y la onda (elástica) que llega al transductor-receptor genera una nueva onda (eléctrica) que pasa al amplificador después de atravesar el atenuador. Finalmente, va también al tubo de rayos catódicos.

La primera disposición práctica basada en el sistema anterior parece que se debe a Long y colaboradores (2) allá por el año 1945. En los últimos 10 ó 15 años estos esquemas primitivos han sufrido algunas variaciones de detalle, pero, sustancialmente, no se han alterado mucho.

Cronológicamente, los americanos Leslie y Cheesman (3), recogiendo las experiencias de Long, proyectaron y construyeron el Soniscope (3), primer aparato práctico para la auscultación ultrasónica del hormigón. Un poco más tarde, Jones y Gatfield (4) construyeron la versión inglesa del Soniscope (éste era americano-canadiense), que habría de dar lugar al aparato comercial conocido como UTC.

La diferencia fundamental entre el Soniscope y el UTC es puramente electrónica y se refiere, principalmente, al empleo de un doble haz en el Soniscope, mientras que la pantalla del UTC presenta una traza semejante a la de los osciloscopios normales de un solo canal. También existen diferencias en las frecuencias de trabajo.

2.1. Algunas relaciones fundamentales

Cuando una onda elástica de frecuencia ultrasónica (20-200 kc/seg) incide sobre la superficie de un sólido, una parte de la energía incidente se refleja sobre dicha superficie y otra parte se transmite a través del sólido.

- (1) BIQUARD, P., y AGIER, C.: Cahiers phys., 15, 21 (1943).
- (2) LONG, B. G.; KURTZ, H. J., y SANDEMAN, T. A.: J. Am. Conc. Inst., 16, 3 (1945).
- (3) LESLIE, J. R., y CHEESMAN, W. J.: J. Am. Conc. Inst., 17, sep. (1949).
- (4) JONES, R., y GATFIELD, E. N.: Road Res. Tech. Paper, núm. 34, Londres (1955).

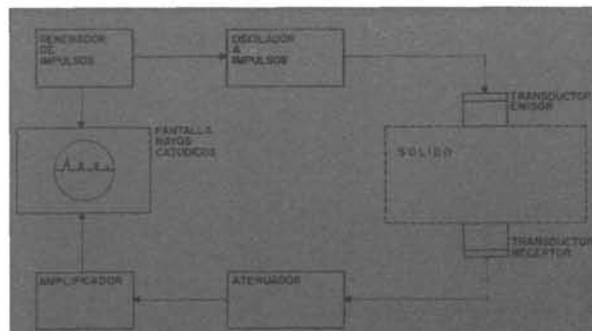


Fig. 1. Método del impulso con doble transductor.

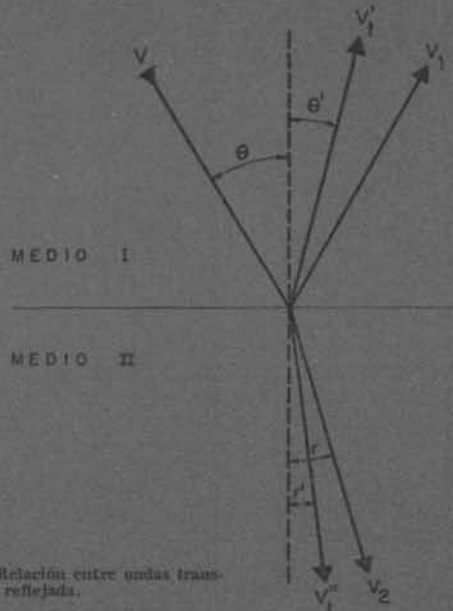


Fig. 2. Relación entre ondas transmitida y reflejada.

Si la incidencia es oblicua, caso general, la onda incidente da lugar a dos ondas reflejadas y dos refractadas: una onda reflejada longitudinal de velocidad V_1 y otra reflejada transversal de velocidad V'_t ; las dos refractadas que también se forman tienen velocidades V_2 y V''_t .

La relación que las liga (fig. 2) es semejante a la que se emplea en óptica:

$$\frac{\sin \vartheta}{V_1} = \frac{\sin \vartheta'}{V'_t} = \frac{\sin r}{V_2} = \frac{\sin r'}{V''_t} \quad [1]$$

La distribución de energía entre los diferentes impulsos depende de las velocidades relativas de las diferentes ondas, de las densidades relativas de ambos medios ϱ_1 y ϱ_2 y del ángulo de incidencia del haz principal:

$$\frac{e_r}{e_i} = \left[\frac{\varrho_1 V_1 - \varrho_2 V_2}{\varrho_1 V_1 + \varrho_2 V_2} \right]^2 \quad [2]$$

De la fórmula [2] resulta claro que la energía reflejada será tanto mayor cuanto más diferentes sean los productos $\varrho_1 V_1$ y $\varrho_2 V_2$, que son las llamadas «impedancias acústicas» de los medios I y II (fig. 2). Resulta evidente que en nuestro caso, figura 1, los medios I y II serán, respectivamente, el material sólido del propio transductor y el sólido en estudio.

El mayor coeficiente de reflexión corresponderá a una interfase aire-sólido (medio I igual al aire), puesto que la impedancia acústica del aire es muy pequeña comparada con la de los sólidos. La reflexión es casi total para una interfase aire-hormigón e igual a 0,6—0,8 para una interfase agua-hormigón.

Como el hormigón no es un medio homogéneo sino que contiene dos componentes principales, grava y mortero, con impedancias acústicas diferentes ($1,5 \times 10^6$ u.c.g.s. y $0,9 \times 10^6$ u.c.g.s., respectivamente), existirá siempre una reflexión apreciable en cada interfase árido-mortero. Esto se complica aún más si existen en el interior del hormigón interfases aire-hormigón (grietas o coqueas).

Todo ello da lugar a una distorsión en los impulsos transmitidos, especialmente si la longitud de onda es corta comparada con la distancia entre dos fases consecutivas. Aparece entonces el fenómeno de la *difracción* de la energía elástica.

Las cosas se complican todavía más si pensamos que la energía no se aplica directamente desde el emisor, generalmente un cristal piezoeléctrico de titanato de bario, a la superficie del hormigón. En la práctica se intercala una fina capa de aceite, vaselina, suspensión de bentonita o sustancia análoga.

En este caso, la transmisión se hace a través de tres medios: el propio cristal, la capa interpuesta y el hormigón (1). Para obtener un buen rendimiento en la transmisión de energía, con lo cual la onda recibida en la cara opuesta del hormigón será más intensa (fig. 1) hay que tener presentes los dos puntos fundamentales siguientes:

- a) Que el espesor de la capa o película de acoplamiento sea inferior a 1/4 de la longitud de onda empleada.
- b) Que su impedancia acústica sea lo más parecida posible a la media geométrica entre la impedancia del cristal ($27,5 \times 10^5$ u.c.g.s. para el titanato de bario) y la del hormigón ($1,2 \times 10^6$ u.c.g.s.).

2.2. Frecuencia de las ondas ultrasónicas

Otra característica importante en la propagación de las ondas elásticas de frecuencia ultrasónica es su *direccionalidad*. Debido a la, en general, corta longitud de onda de los impulsos ultrasónicos, estas ondas elásticas se propagan prácticamente en línea recta. Esto es lo que las hace muy útiles para la localización de defectos.

No obstante, siempre existe alguna dispersión que es tanto mayor cuanto mayor es la longitud de onda.

El ángulo de dispersión ψ viene dado por la relación:

$$\sin \frac{\psi}{2} = \frac{1,2\lambda}{\varnothing} \quad [3]$$

(1) Un tratamiento matemático completo de esta cuestión se dará en un próximo trabajo.

en la que ϕ es el diámetro de la fuente productora (transductor). Fuera del ángulo ψ la energía transmitida cae prácticamente a cero.

La ecuación [3] indica que debe emplearse una frecuencia lo más alta posible (valor pequeño para λ). Pero esto está en oposición con la atenuación y difracción de la energía elástica que aumentan rápidamente al hacerse más corta la longitud de onda, tal como se expresó en 2.1.

El *grano* del material exige que la longitud de onda sea mayor que el tamaño de las partículas o granos de que está constituido. Esto es muy fácil trabajando con metales, como el acero o el aluminio, cuyo fino grano permite operar con frecuencias de varios megaciclos y obtener haces de energía muy estrechos, de unos 10° , altamente direccionales.

Las cosas son muy diferentes con el hormigón. Al tratarse de una serie de piedras—grava—embebidas en una matriz—el mortero—no es posible emplear frecuencias superiores a los 500 kc/segundo.

A esta frecuencia, la longitud de onda en el hormigón viene a ser de 1,25 cm. A 500 kc aún se consigue alguna direccionalidad, pero la atenuación es tal que la penetración de estos haces no supera los 15 ó 20 centímetros de hormigón.

Para poder auscultar espesores de unos 10 m es necesario emplear frecuencias de unos 20 kc/seg y entonces la direccionalidad es muy baja. En los aparatos ultrasónicos corrientes para hormigón se emplean frecuencias de unos 100 kc, con lo cual se consigue buena direccionalidad y penetración hasta 40 ó 50 cm de hormigón, que son espesores muy comunes en las estructuras.

Nosotros hemos resuelto el problema trabajando a 200 kc para espesores pequeños y a 20 kc para grandes masas de hormigón.

2.3. Las diferentes ondas en el hormigón

Cuando se excita elásticamente un hormigón pueden producirse simultáneamente cuatro tipos de ondas caracterizadas por su diferente velocidad de propagación.

El primer tipo lo forman las ondas longitudinales o de compresión en las que el desplazamiento de partículas tiene lugar en la dirección de propagación. Su velocidad viene dada por la conocida fórmula:

$$V_1^2 = \frac{E}{\rho} \frac{g(1-\eta)}{(1+\eta)(1-2\eta)} \quad [4]$$

en la cual E es el módulo de elasticidad dinámico, ρ la densidad del hormigón, g la constante gravitatoria y η la relación de Poisson.

El segundo tipo de ondas está constituido por las transversales, a esfuerzo cortante o a torsión, en las que el desplazamiento de partículas es perpendicular a la dirección de propagación. Su velocidad es:

$$V_2^2 = \frac{gE}{2\rho(1+\eta)} \quad [5]$$

Una tercera clase la forman las ondas de Rayleigh o superficiales que se propagan solamente por la superficie del sólido y tienen un movimiento de partícula en forma de elipse, es decir, con un componente de desplazamiento normal a la superficie y un componente menor en la dirección de propagación. Su velocidad viene dada por:

$$V_3^2 = p^2 \cdot V_2^2 \quad [6]$$

donde p vale entre 0,90 y 0,93.

Existe, finalmente, un último tipo de ondas, las de Lamb, que pueden engendrarse cuando se excita ultrasónicamente una pieza sólida en forma de placa u hoja cuyo espesor es comparable a la longitud de onda. Como esto está muy alejado de los métodos de trabajo en el hormigón, no insistimos en este punto.

Diremos, para terminar, que las velocidades indicadas cumplen la relación:

$$V_1 > V_2 > V_3 \quad [7]$$

En la práctica, los transductores ultrasónicos piezoeléctricos se diseñan de tal modo que solamente excitan en el hormigón ondas longitudinales de velocidad V_l . En efecto, este tipo de ondas se propaga más fácilmente a través de las finas películas de aceite o vaselina empleadas como acopladores.

Además, al ser la onda más rápida (ver [7]) su momento exacto de llegada a la cara opuesta de la pieza puede determinarse más fácil y precisamente aun en presencia de otros tipos de impulsos.

Cuando se quiere introducir en el hormigón ondas transversales o de superficie se recurre a transductores en cuña, especialmente diseñados para esta finalidad o al empleo de acopladores sólidos—generalmente piezas de plexiglás de perfil estudiado—, que actúan como *filtros* para las ondas que se quiere eliminar.

2.4. Velocidad de ondas y velocidad de grupo

La diferencia entre una onda continua sostenida de frecuencia ν y un tren de impulsos de ondas de la misma frecuencia, pero con una *frecuencia de interrupción* f mucho más baja que ν , impone una distinción que es necesario tratar con más detalle.

La figura 3 muestra una onda continua de frecuencia ν que se interrumpe a intervalos $1/f$, siendo f la frecuencia de interrupción. En nuestro aparato la frecuencia ultrasónica es $\nu = 200.000$ c/seg, mientras que la de interrupción es $f = 50$ c/segundo.

A la velocidad con que se propaga en el sólido la onda continua se la denomina velocidad de onda V , mientras que a la velocidad con que avanza la envuelta del tren de ondas a través del medio es la velocidad de grupo V_g . Estas velocidades no son necesariamente idénticas.

Un buen ejemplo lo constituye un grupo de olas que se producen en la superficie de aguas profundas. El frente de onda, en este caso, avanza con una velocidad que es sólo la mitad de la velocidad de las olas individuales en el grupo. El perfil cambia continuamente de forma al avanzar, y cualquier ola individual en el grupo puede desaparecer después de un corto intervalo de tiempo.

Rayleigh (1) ha mostrado que siempre que la velocidad de ondas V en un material varía con la frecuencia, es decir, con la longitud de onda, la velocidad de grupo V_g no es igual a V . Un material de este tipo se dice que es *dispersivo*. Es decir, en él se verifica:

$$\frac{V}{\nu} \neq \text{constante.} \quad [8]$$

La relación entre V_g y V es:

$$V_g = \frac{d\left(\frac{V}{\lambda}\right)}{d\left(\frac{1}{\lambda}\right)} = V - \lambda \frac{dV}{d\lambda} \quad [9]$$

siendo λ la longitud de onda.

Cuando
$$\frac{dV}{d\lambda} = 0, V_g = V$$

Es decir, si se puede demostrar que la velocidad de ondas V es independiente de la frecuencia, las velocidades de grupo y de ondas son iguales. Parshad (2) ha demostrado que en el hormigón estas velocidades

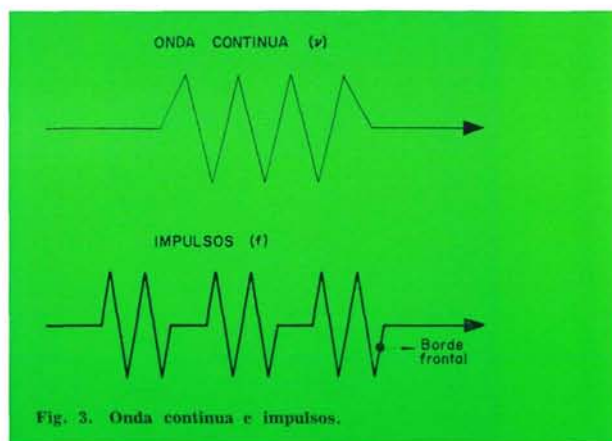


Fig. 3. Onda continua e impulsos.

(1) RAYLEIGH, J. W.: "Theory of Sound", vol. I. Dover Press, Nueva York.

(2) PARSHAD, R.: Nature, 637, noviembre 1945.

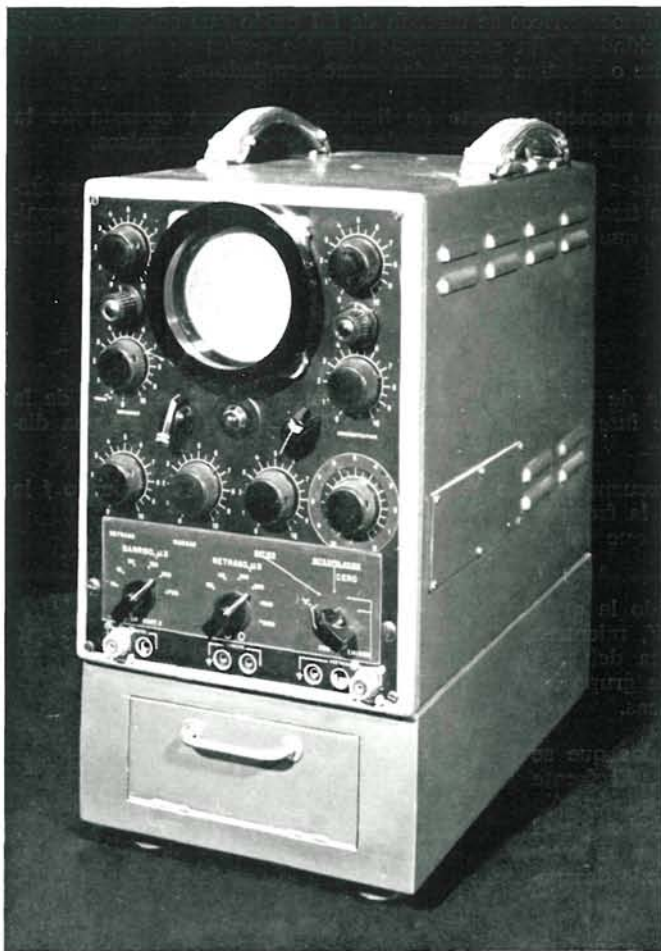


Fig. 4. Aspecto general del aparato.

El nuevo aparato ultrasónico a impulsos del I.E.T.c.c. tiene unas dimensiones de $44 \times 41 \times 25$ cm y su peso es de 26,8 kg. Su aspecto exterior puede verse en la figura 4.

Se alimenta de la red de 125 voltios y su consumo es de 182 vatios.

3.1. Esquema funcional

La parte fundamental del aparato es la *unidad de disparo*, cuya misión es lanzar un impulso cuadrado de polaridad negativa cada $1/50$ de segundo. Este impulso sigue tres caminos: Por el primero va a una unidad de *retraso* y de aquí a la *base de tiempos* o unidad de barrido horizontal del osciloscopio (fig. 5).

Por el segundo se conduce a un *marcador de tiempos*, cuya misión es producir trenes de impulsos muy breves cada 10 microsegundos, que se aplican a la placa vertical V_1 del osciloscopio, provocando la aparición en su pantalla de una fina retícula con espaciados de 10 microsegundos.

Finalmente, el tercer camino lleva la onda cuadrada a otra unidad de *retraso*, variable en sólo 10 microsegundos, y de aquí al *emisor* propiamente dicho, cuya misión es engendrar un tren de ondas de 200 kc/s de frecuencia, interrumpido cada $1/50$ de segundo.

Estas ondas de alta frecuencia, con una frecuencia de repetición muy baja (50 c/seg) se envían al transductor a cristal de titanato de bario *E*, el cual se encarga de convertir la excitación eléctrica en un tren de ondas elásticas que se aplican al hormigón.

(1) McMILLEN, J. H.: J. Acoust. Soc., vol. 18, núm. 1, julio (1946).

son prácticamente iguales, y ello justifica que se pueda trabajar con el aparato ultrasónico con frecuencias entre 20 y 200 kc/seg sin cometer errores.

Algunos investigadores han propuesto que, cuando se trabaja con impulsos, las fórmulas que relacionan V y E , [4], [5] y [6] deben ser diferentes si se trata de probetas de laboratorio, placas delgadas u hormigón en masa. Según McMillen (1) esto no es verdad si se considera que, con impulsos ultrasónicos, las determinaciones se hacen midiendo el tiempo de llegada del borde frontal del impulso, es decir, refiriéndonos a la figura 3, de la primera semionda de cada grupo de impulsos.

Esto es tanto como suponer que el frente de onda del impulso viaja a través del sólido con idéntica velocidad que tendría una onda continua transmitiéndose en régimen permanente a través del material.

Las experiencias hechas por otros autores y por nosotros mismos indican que la velocidad de impulso de onda a 20-200 kc, a través de probetas, placas, prismas y bloques de hormigón es prácticamente independiente de la trayectoria seguida y de la forma del sólido en cuestión. Todo ello dentro de los errores experimentales.

3 Descripción del aparato

El nuevo aparato ultrasónico a impulsos

Puede verse en la figura 5 cómo una señal *cero* extraída del emisor, pero de intensidad menor que la enviada al cristal, se manda a la placa V_2 del tubo de rayos catódicos con fines de identificación del instante inicial o cero.

La onda elástica que atraviesa el hormigón, una vez convertida por el transductor R en una excitación eléctrica, pasa al *receptor* encargado de amplificarla y mandarla a la placa V_1 del tubo de rayos catódicos.

La unidad de retraso del emisor requiere alguna aclaración. La onda recibida en la placa V_1 a través del receptor caerá, en general, entre dos marcas de 10 microsegundos de la retícula producida por el marcador de tiempos. Con objeto de poder interpolar en el intervalo de 10 microsegundos, la onda que sale del emisor a E se puede retrasar desde 0 a 10 microsegundos con objeto de obtener la coincidencia de la onda recibida, exactamente sobre una de las marcas de 10 microsegundos.

El botón de mando de este retrasador va calibrado en unidades de 1 microsegundo, que es el límite máximo de apreciación de tiempo del aparato.

Como el retraso de la base de tiempos puede alcanzar los 1.200 microsegundos y el ancho de la pantalla de rayos catódicos corresponde a 450 microsegundos en la posición de barrido más lento, el alcance máximo de medida del aparato será de 1.650 microsegundos. El mínimo es, por supuesto, de 1 microsegundo.

Esto corresponde, aproximadamente, a un campo de medidas en hormigón normal de 6,6 a 0,04 m, expresado en espesor, lo cual es más que suficiente para fines prácticos.

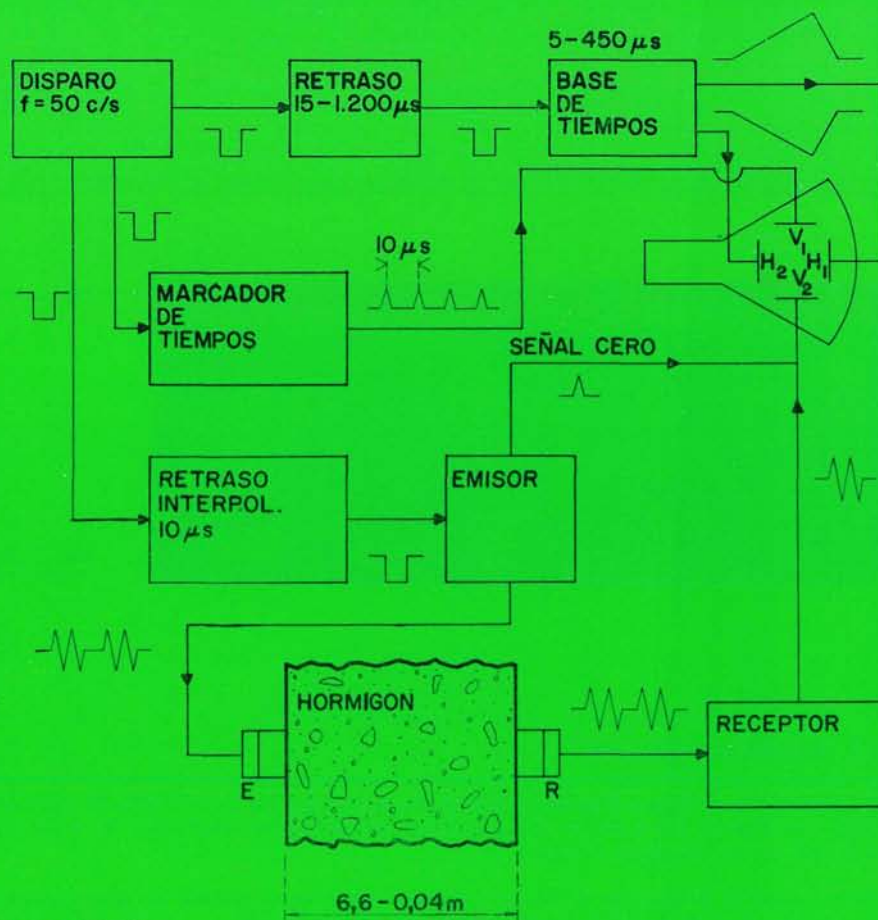


Fig. 5. Esquema de principio del equipo ultrasónico.

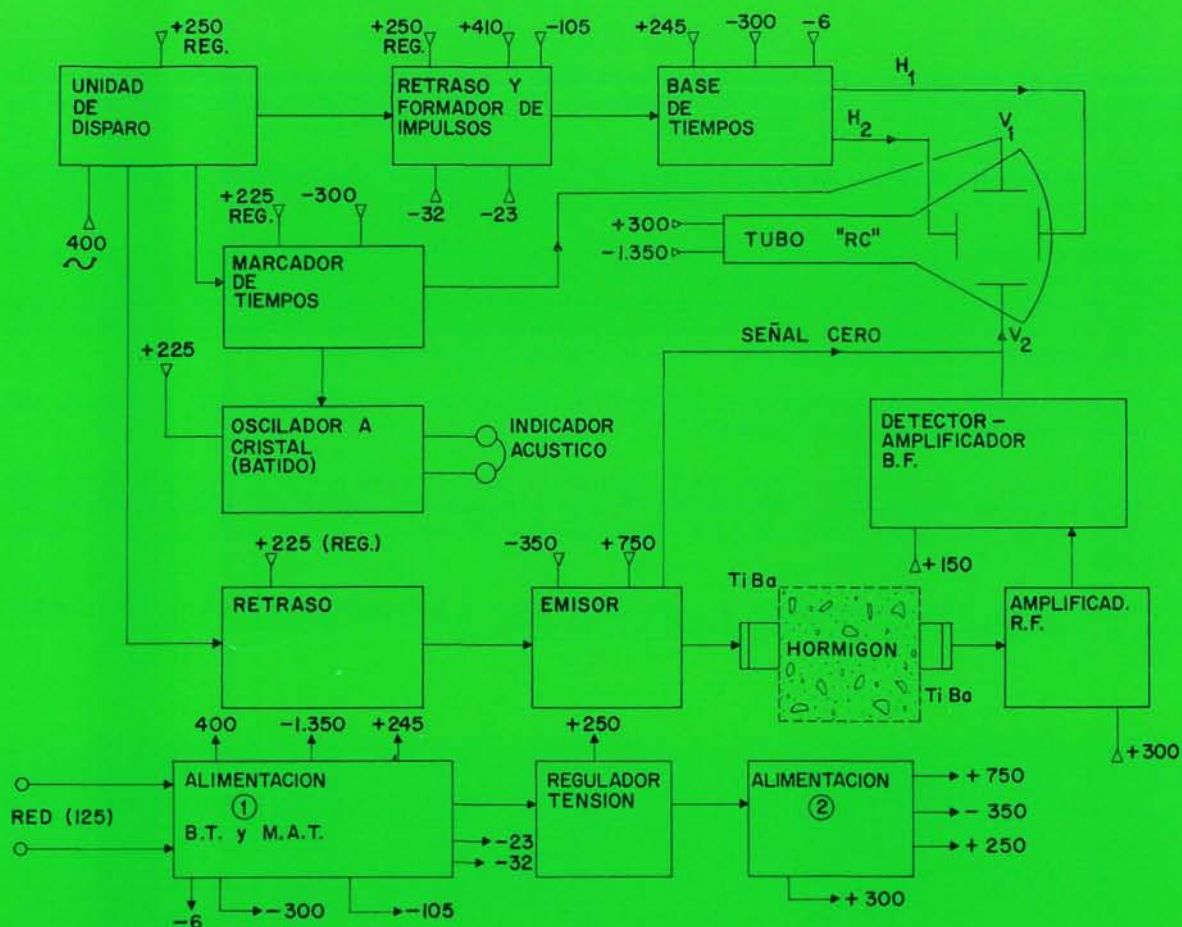


Fig. 6. Esquema de bloques del aparato.

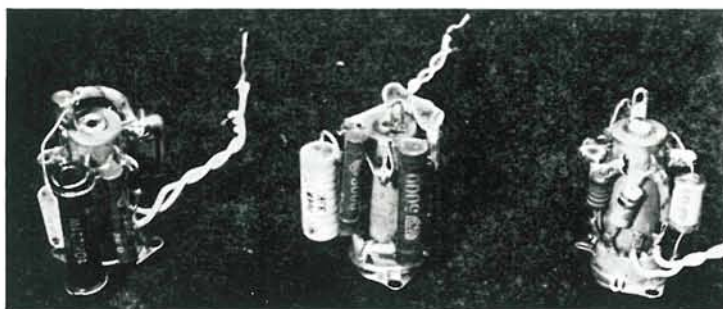


Fig. 7. Montaje en torretas que ahorra espacio en el chasis.

3.2. Detalles constructivos

El croquis de la figura 5 es un esquema de principio. En la práctica el aparato incluye una serie de unidades auxiliares, tales como alimentadores estabilizados, oscilador de control, unidades de deflexión del tubo de rayos catódicos y otras.

El esquema de bloques de la figura 6 incluye todas las unidades de que consta el aparato, con indicación de las fuentes de tensión precisas para su alimentación.

Fig. 8. Vista interior, lado izquierdo.

Fig. 9. Vista interior, lado derecho.

Fig. 10. Vista inferior. Obsérvese la alta densidad de montaje.

Aun cuando se trata de circuitos relativamente sencillos, la complejidad electrónica del equipo es bastante grande considerado en conjunto. En total incluye 26 válvulas electrónicas, 7 diodos de germanio o silicio, cristal de cuarzo, estabilizadores de gas y un número muy elevado de condensadores, resistencias, transformadores de impulsos, ventiladores, etc.

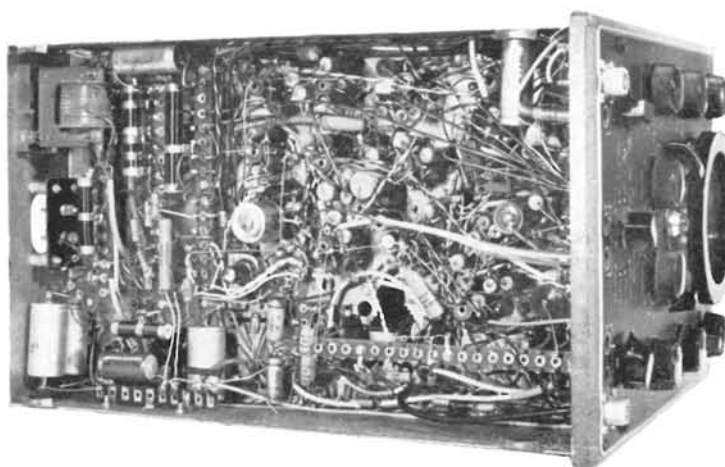
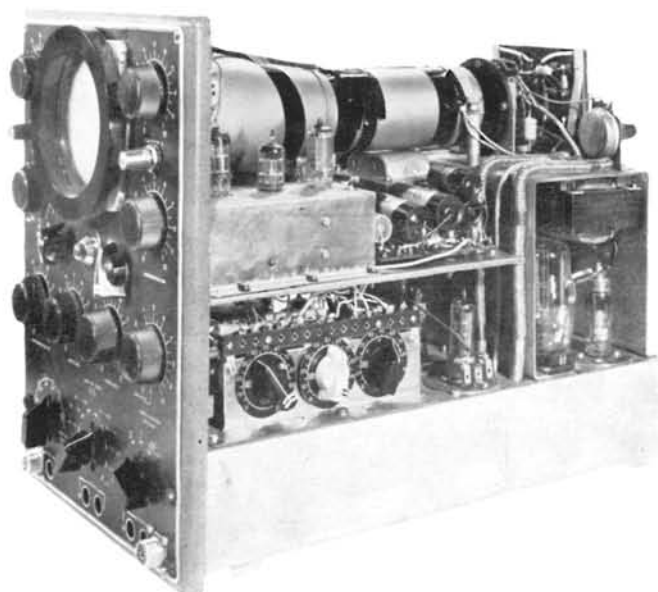
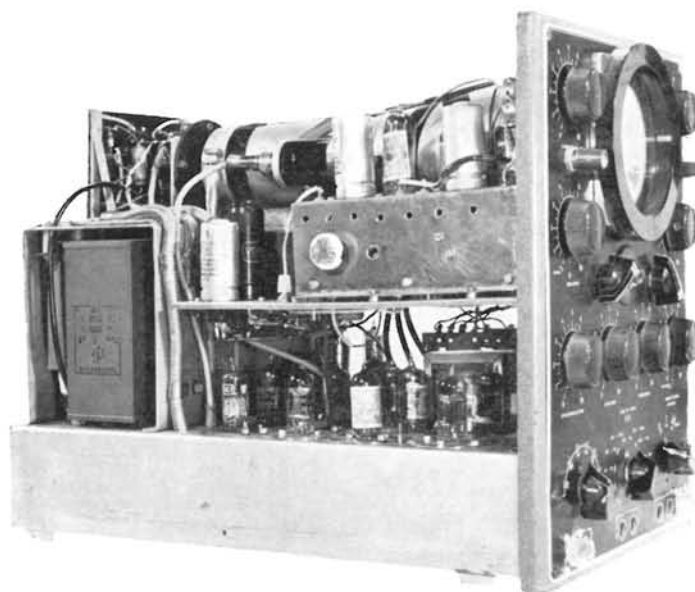
Para poder albergar todo este material en el espacio disponible (30 dm^3) fue preciso utilizar sistemas constructivos especiales tales como el montaje en torretas (fig. 7) y la superposición en varios pisos, tal como puede apreciarse claramente en la figura 8, que muestra el lado izquierdo del aparato, desprovisto de su base, donde van dispuestos los dispositivos de ventilación forzada.

La vista del costado derecho, figura 9, muestra algunos controles internos (semiajustables) que pueden ser accesibles desde el exterior gracias a una puerta practicable.

Finalmente, una vista inferior del aparato (fig. 10) da idea de la alta densidad de montaje que hemos insinuado antes y en la que pueden apreciarse claramente el eficaz aprovechamiento del espacio y el montaje en torretas.

A pesar de esta elevada densidad de componentes no hemos experimentado problema alguno de concentración de calor y, por ende, no se producen desplazamientos de frecuencia o derivas una vez que han transcurrido algunos minutos desde la puesta en marcha del equipo.

Como detalles distintivos de este equipo cabe señalar la presencia de un circuito fantastrón con válvula 6AS6 en el mecanismo de retraso del emisor (10 microsegundos), un montaje en sanatrón para la base de tiempos que proporciona barridos estrictamente lineales, y la presencia de dos reguladores electrónicos con válvulas múltiples.



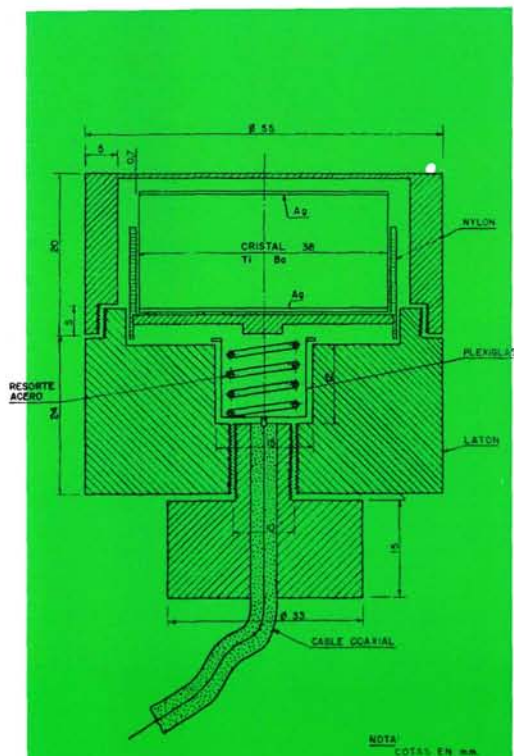
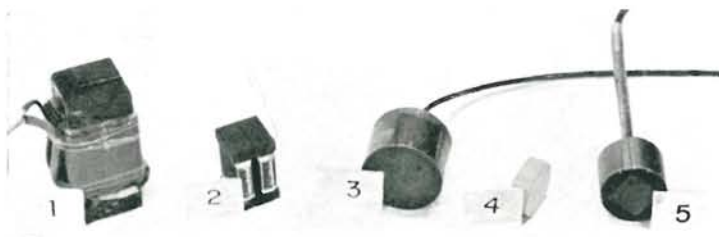
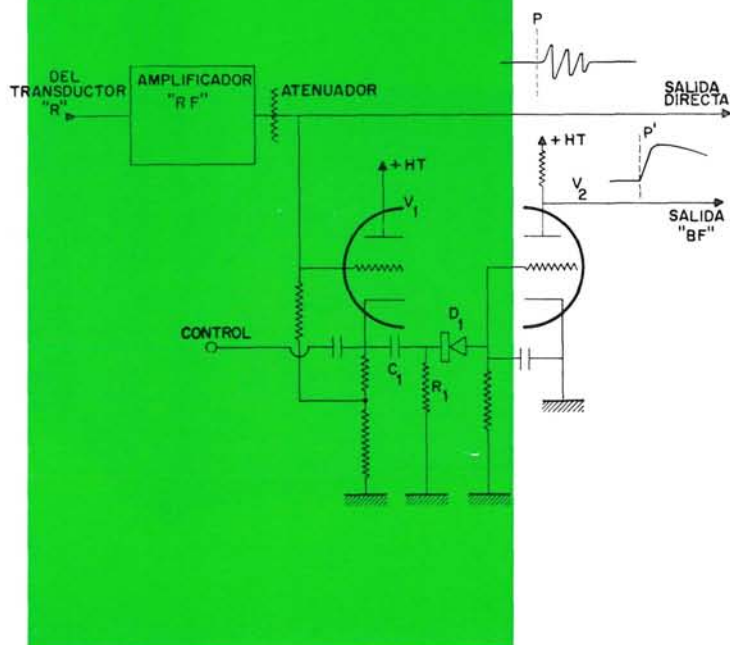


Fig. 11. Distintos tipos de transductores: 1, Ferroxcube, 22 kc; 2, Ferroxcube, 40 kc; 3, Transductor a titanato de bario; 4, Pastilla de titanato, 200 kc; 5, Montaje en mosaico.

Fig. 12. Detalle del montaje del transductor 3, figura 11.

Fig. 13. Detalle del circuito de salida.



Todo ello da lugar a que la estabilidad funcional del aparato sea excelente, permitiendo efectuar medidas de larga duración con toda comodidad y reproducibilidad.

Otras características que creemos enteramente originales en esta clase de equipos son: la posibilidad de controlar la frecuencia del marcador de tiempos (frecuencia = 100 kc/seg) que proporciona la retícula de 10 microsegundos, el empleo de un doble circuito de salida en el emisor, y la presencia en el receptor de un doble canal RF-BF que permite un ajuste muy exacto del impulso de llegada para evitar errores.

En cuanto al primero, se ha dispuesto un oscilador a cristal SEPE, tipo OM, de 1 Mc/seg (precisión $\pm 1/10.000$). La salida de este cristal—montado en un circuito oscilante—se heterodina con el 10º armónico del marcador (100 kc/seg), y el batido resultante se detecta sencillamente con un par de auriculares telefónicos. La precisión de calibrado es muy grande y el sistema no necesita indicadores de resonancia más o menos complejos.

El otro circuito a que hemos hecho alusión es la posibilidad de utilizar indistintamente transductores piezoeléctricos a titanato de bario o ferroeléctricos a base de Ferroxcube, y ello por el sencillo movimiento de un conmutador.

La figura 11 muestra los diferentes tipos de transductores que hemos ensayado y que normalmente empleamos en nuestras experiencias. El transductor de baja frecuencia, a Ferroxcube 7A2 (núm. 1 de la fig. 11), está especialmente adaptado para trabajar con grandes espesores de hormigón y su frecuencia natural es 21,8-22,3 kc/seg. Similar a éste es el de 40 kc (núm. 2) para espesores medios. El transductor número 3 (fig. 11) contiene un disco o pastilla de titanato de bario cortado a una frecuencia de 200 kc (núm. 4, fig. 11), mientras que el transductor número 5 está formado por un mosaico de cristales piezoeléctricos de titanato y se adapta muy bien como transductor-receptor.

Fig. 14. Trazo luminoso en la posición 2.—Fig. 15. Reticula con impulsos de 10 microsegundos: campo 260 μ s.—Fig. 16. Reticula con 110 microsegundos. Obsérvese el impulso inicial a los 50 μ s.—Fig. 17. Posición de barrido para pequeñas probetas (25 μ s).—Fig. 18. Impulso recibido después de atravesar el hormigón (55 μ s).—Fig. 19. Acción del circuito diferenciador.

La figura 12 muestra el dispositivo de montaje del disco de titanato de 200 kc (núm. 4, fig. 11), construido todo él en latón y nylon, en nuestro propio laboratorio.

Finalmente, debemos comentar el circuito de salida del receptor, figura 13, especialmente diseñado para obtener señales de RF y BF aptas para ser presentadas en la pantalla del tubo de rayos catódicos.

La señal de RF del transductor-receptor pasa a un amplificador de alta frecuencia y gran banda pasante (500 kc) con una ganancia total de 250.000 (amplificador «RF» en la figura 13). Esta señal puede ser llevada directamente a la pantalla, apareciendo entonces como una onda más o menos amortiguada en la cual puede resultar difícil, a veces, detectar el punto *P* (figura 13) de comienzo del tren de ondas.

Por el contrario, cuando la señal se envía a través de un seguidor de cátodo (V_1 , fig. 13) y un circuito diferenciador $C_1 - R_1$ a un diodo detector D_1 y un amplificador de BF, V_2 , se obtiene una señal, figura 13, en la que resulta muy fácil detectar el punto *P'* con una gran exactitud. Por supuesto, los puntos *P* y *P'* coinciden en el tiempo. En el apartado 4 veremos esto experimentalmente.

4 Ajuste y funcionamiento

El funcionamiento del equipo anteriormente reseñado es bastante sencillo y cualquier técnico puede familiarizarse rápidamente con sus características.

Un conmutador principal de cinco posiciones permite poner en marcha el aparato. En la posición 1 el equipo está desconectado. Al pasar a la posición 2 se conecta la alimentación y, al cabo de algunos segundos se enciende una luz roja frontal, indicando que los sistemas reguladores funcionan correctamente.

Aparece sobre la pantalla una traza luminosa lisa (fig. 14), cuya intensidad lumínica, foco, astigmatismo y posición horizontal y vertical pueden ajustarse a voluntad. Este ajuste es prácticamente permanente. Pasados cinco minutos se enchufan unos auriculares y se busca el batido de frecuencia mediante el control correspondiente. La señal auditiva es netamente perceptible.

Se pasa entonces el conmutador principal a la posición 3, en la que aparecen (fig. 15) la retícula con impulsos de 10 microsegundos más o menos separados según la posición del control de barrido (figs. 16 y 17) y el impulso inicial. En esta posición, el impulso inicial puede llevarse a coincidencia, mediante los controles correspondientes, con una de las marcas de 10 microsegundos. Durante esta operación, el control de ganancia del receptor debe permanecer en cero.

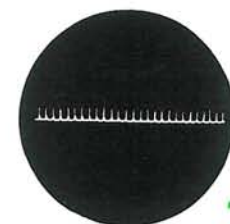
La posición 4 del conmutador corresponde al régimen normal de medida de espesores pequeños con transductores piezoeléctricos. Se aplican entonces los transductores emisor y receptor sobre caras opuestas del hormigón, convenientemente alisadas, intercalando una fina capa de vaselina entre sus caras activas y el hormigón.

La traza aparece entonces como en la figura 18, en la cual puede verse una representación de la onda recibida tal como sale del receptor-amplificador.

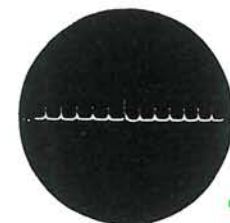
Moviendo el control de interpolación puede llevarse la indicación del tren de ondas (punto *P*, fig. 13) a coincidir con la marca más próxima de 10 microsegundos.



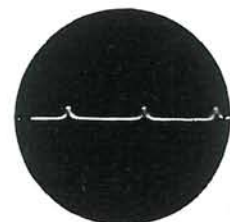
14



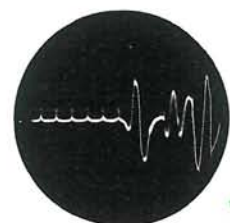
15



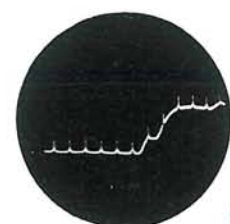
16



17



18



19

El tiempo que se quiere medir se obtiene contando los intervalos de 10 microsegundos entre la señal cero (impulso inicial) y el punto P y sumando o restando los microsegundos que haya sido necesario mover el control de interpolación para lograr la coincidencia.

Si hay alguna inseguridad en la posición exacta del punto P puede emplearse el circuito diferenciador y entonces la traza aparece como en la figura 19, en la que resulta sumamente fácil determinar el punto exacto de llegada del impulso recibido, si bien se pierde, en este caso, la posible información sobre la deformación que haya podido sufrir la onda a su paso por el hormigón. Claro es que pueden combinarse fácilmente ambas técnicas de medida.

La posición 5 del conmutador general es análoga, a todos los efectos, a la 4, excepto que en aquélla deben emplearse transductores de ferrita. Todas las demás condiciones funcionales se mantienen.

5 Ventajas y limitaciones del método de impulsos

Tal como se indicó en 2.4, la velocidad de propagación de las ondas elásticas ultrasónicas en el hormigón es prácticamente independiente de la frecuencia, de la trayectoria, de la forma y dimensiones de la pieza en ensayo y de otras circunstancias. El método es igualmente aplicable a hormigón en masa, estructuras, pavimentos y probetas de laboratorio.

No presenta, por ejemplo, las desventajas del método sónico a resonancia, cuyos resultados son función de la forma geométrica de la probeta; no hace precisa la extracción de testigos de una estructura y puede aplicarse en cualquier ocasión y circunstancia.

Sus aplicaciones en la detección de fisuras, grietas, coqueras, imperfecciones en el hormigón y otras cualidades, han sido muy bien detalladas por Jones (1). Este autor estudia los efectos de la heterogeneidad, visco-elasticidad, granulometría y anisotropía sobre la propagación de los impulsos. También indica sus aplicaciones al ensayo de piezas prefabricadas.

Con este método, la variable que se determina es siempre la velocidad de propagación V (ver 2.3). Si se conocen o estiman ρ y η , la aplicación de la fórmula [4] para determinar el módulo de elasticidad dinámico E es inmediata.

Más cómodo resulta utilizar las gráficas de Leslie (2), figura 20, que relacionan la velocidad en m/seg con el módulo E en kg/cm². Las tres curvas de la figura 20 corresponden a 2,275, 2,340 y 2,400 kg/dm³, es decir, a tres densidades comunes en el hormigón normal.

También se puede emplear la velocidad dada por el aparato ultrasónico para determinar *directamente* la resistencia mecánica a compresión del hormigón.

Son muchos los trabajos realizados por diversos investigadores para correlacionar tanto el módulo E como la velocidad V con la resistencia, que es, en fin de cuentas, el parámetro que el constructor prefiere cuando trata de conocer un hormigón.

En este sentido, las gráficas de Kreijger y Wiebenga (fig. 21) son de lo más completo que se ha publicado recientemente (3). Las curvas

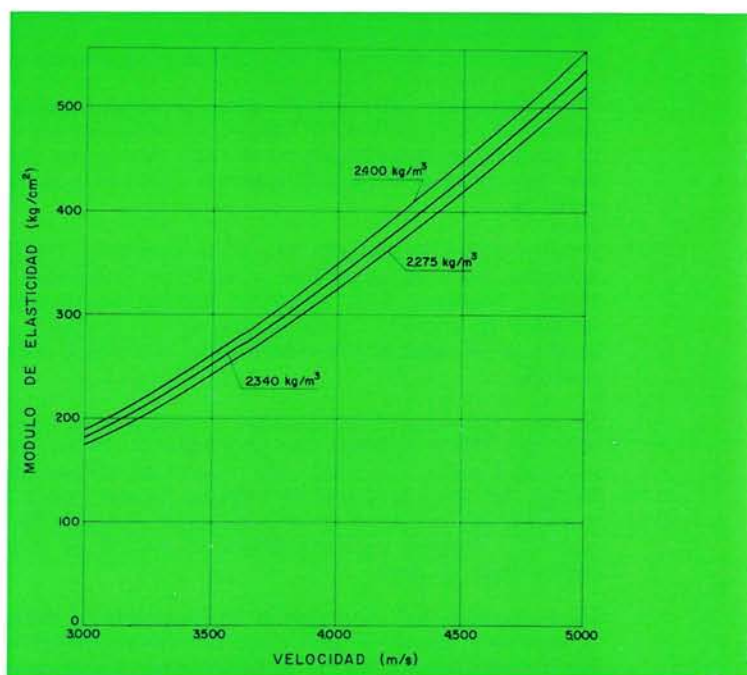


Fig. 20. Relación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de propagación (según Leslie).

- (1) JONES, R.: Non-destructive testing of concrete. Cambridge University Press. Londres (1962).
- (2) LESLIE, J. R.: A.S.T.M., Reprint núm. 75, junio (1950).
- (3) KREIJGER, P. C., y WIEBENGA, J. G.: Report núm. BI-61-5/4911 del Instituto TNO, Delft, Holanda (1961).

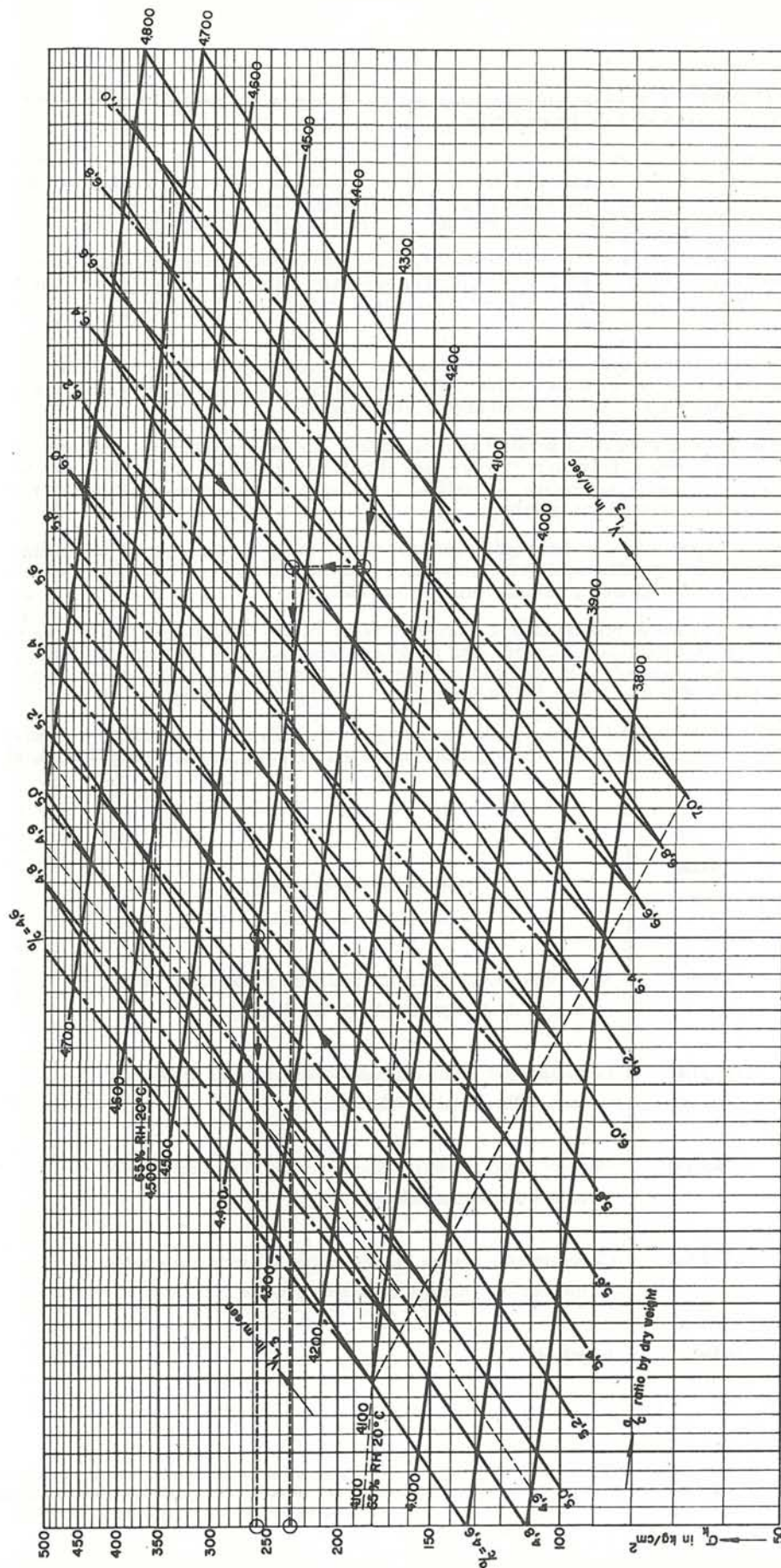


Fig. 21. Relación entre resistencia y velocidad de propagación (según Kreijger y Wiebenga). σ_k es la resistencia en kg/cm^2 ; a/c la relación árido : cemento; V_{L_2} la velocidad de propagación; RH, la humedad relativa del aire durante la conservación del hormigón. Los ejemplos representados corresponden a: $V_{L_2} = 4.400 \text{ m/s}$; $a/c = 5.2$, curado bajo agua; $\sigma_k = 258 \text{ kg/cm}^2$; $V_{L_2} = 4.300 \text{ m/s}$; $a/c = 6.4$; curado a 65 % RH; $\sigma_k = 232 \text{ kg/cm}^2$.

dan la resistencia obtenida en probetas curadas bajo agua o al aire a 65 por 100 de humedad relativa, a 20°C, en función de la velocidad de propagación.

Se ha tenido en cuenta, como parámetro, la relación árido/cemento (en peso, en seco). De este modo, conocidos a/c y la velocidad V de propagación, es posible determinar la resistencia en kg/cm^2 . Esta resistencia será diferente si se considera que el hormigón ha sido mantenido al aire (65 % de humedad, 20°C), o bajo agua (a 20°C). En general, las curvas utilizables serán las correspondientes al aire.

El nomograma de la figura 21 es válido para velocidades de 3.500 a 4.800 m/seg, relaciones árido/cemento de 4,8 a 7 y resistencias mecánicas de 80 a 500 kg/cm^2 . Por supuesto, las curvas de la figura 21 sólo son aplicables a hormigones de cemento portland normal y no deben emplearse con cementos de alta resistencia inicial, de escorias, naturales o siderúrgicos.

Una limitación importante del método es la necesidad de que las superficies de hormigón sobre las que se aplican los transductores sean lo más lisas posible. Sobre ellas se extiende una capa fina de grasa y a continuación se aplican el emisor y el receptor debidamente enfrentados.

Cuando la rugosidad de la superficie no permite esta operación, un buen expediente consiste en aplicar una capa delgada de yeso sobre el hormigón, y sobre ésta, debidamente alisada, se unta la grasa. Si se trata de piezas de hormigón de pequeño espesor, la aplicación del yeso producirá un error en los tiempos de propagación que es necesario tener en cuenta.

Otros errores pueden surgir cuando el hormigón contiene áridos de gran tamaño. El hormigón se hace entonces muy heterogéneo y pueden aparecer dispersiones apreciables. Será preciso entonces hacer varias medidas con diferentes orientaciones y estimar una media razonable.

Si el hormigón es muy poroso se producirá una gran atenuación en las vibraciones ultrasónicas en virtud de la pérdida de energía. En todo caso, siempre será posible (o casi siempre) obtener una señal en el receptor, por supuesto muy atenuada. La amplitud de esta señal, comparada con la que se obtiene en hormigones normales, puede dar una buena indicación sobre la calidad del material.

Como criterio rápido de la calidad resistente de un hormigón normal, con árido silíceo y cemento portland ordinario (P.350, por ejemplo), la tabla siguiente puede servir para juzgar, sobre la obra, el estado de la misma.

Velocidad — m/seg	CALIDAD DEL HORMIGON
2.130	Muy malo. Generalmente fisurado y parcial o totalmente desintegrado. Arido arcilloso.
2.130-3.040	Generalmente malo. Alguna desintegración. Arido rico en arcilla o partes blandas.
3.040-3.650	Dudoso. Algunas fisuras transversales muy finas. Arido calizo o calizo-arcilloso.
3.650-4.560	Generalmente bueno. Arido limpio y ejecución cuidada. No hay fisuras ni desintegración.
4.560	Excelente.

En la construcción de este aparato ha tomado parte muy activa el Sr. W. Sulzberger, de esta División, al cual agradecemos la colaboración prestada.

Appareil ultra-sonique de l'I.E.T.c.c.

J. M. Tobío, Dr. en Chimie Industrielle.

Ce travail est une description d'un nouvel appareil ultra-sonique mis au point par les laboratoires de l'IETec (Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento), qui complète les équipements, pour essais non destructifs, dont dispose la Division de Métrologie.

Comme caractéristiques les plus remarquables de cet appareil il faut signaler: la possibilité de travailler à différentes fréquences (20 à 200 kc/sg) en employant des transducteurs aussi bien de titanate de barium que de ferrite (ferroxcube); contrôle auditif hétérodyne de la fréquence de marquage, et la faculté optionale d'observer l'impulsion reçue, tant en forme d'onde amortie de haute fréquence que d'impulsion différenciée de basse fréquence et grande exactitude.

Sont également révisés les fondements théoriques de la méthode d'impulsions, ainsi que ses applications les plus usuelles, en ce qui concerne son emploi en béton en masse, en structure et même en éprouvettes de laboratoire.

La méthode révisée et décrite possède les limitations inhérentes à cette sorte de procédés non destructifs qui ont été signalés dans des travaux précédents.

Ultrasonic Equipment at the I.E.T.c.c

J. M. Tobío, Dr. industrial chemistry.

A description is given of ultrasonic equipment developed at the I.E.T.c.c. (Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento) laboratory. This equipment is an addition to the facilities which the Metrology Department of the I.E.T.c.c. possessed, to undertake non destructive tests.

The most significant features of this new equipment are: the possibility to work with varying frequencies (20 to 200 kc/sec); the use of both barium titanate and ferrite transducers; heterodyne auditive control of the marking frequency; and optional possibility of observing the incoming impulse both in the form of a damped high frequency wave, and as a low frequency, highly precise differentiated impulse.

A revision of the theoretical basis involved in the impulse method has been carried out, and improvements have been also introduced in the more current applications in connection with mass and structural concrete, and even laboratory specimens.

The revised method of testing has inherent limitations typical of these non destructive systems. These limitations have already been mentioned in earlier papers.

Ultraschallgerät des I.E.T.c.c.

Dr. J. M. Tobío, Chemiker.

Der vorliegende Artikel bringt eine Beschreibung des neuen Ultraschallgeräts, das in den Laboratorien des I.E.T.c.c. entwickelt wurde (Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento). Es vervollständigt die Ausrüstung der Abteilung Metrologie des genannten Instituts für nicht destruktive Untersuchungen.

Die Hauptcharakteristiken sind: Die Möglichkeit, mit verschiedener Frequenz zu arbeiten (20 bis 200 kc/sec), indem man Bariumtitanat und Ferrit-Übersetzer verwendet, und eine auditive heterodyne Kontrolle der Markierungsfrequenz durchzuführen. Ferner erlaubt es, den Impuls sowohl in Form einer gedämpften Welle mit hoher Frequenz als auch in unterschiedlicher, niedriger Frequenz und grosser Genauigkeit zu kontrollieren.

Ebenso werden die theoretischen Grundlagen der Impulsmethode revidiert, desgleichen die Hauptanwendungsmöglichkeiten für Massbeton, Strukturbeton und sogar Laboratoriumsproben.

Die revidierte Methode besitzt die den nicht destruktiven Versuchsmethoden eigenen Einschränkungen, die in den vorhergehenden Arbeiten hervorgehoben wurden.